УДК 629.78.01

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

М.В. Михайлов, Ю.М. Казанцев

ФГУП «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск
E-mail: polus@online.tomsk.net

Исследуется интегрированная модель каналов электропитания стационарного плазменного двигателя, включающая модели солнечной батареи, канала разряда анод – катод и системы электропитания. Показан алгоритм функционирования модели и диаграммы тока и напряжения разряда для различных режимов работы двигателя. С помощью полученных диаграмм определено наибольшее перерегулирование в системе с четырьмя замкнутыми обратными связями и на основании «гипотезы фильтра» сделан вывод об ее устойчивости. Предложенная модель позволяет имитировать все режимы работы системы электропитания, а также моделировать различные варианты запуска двигателя и работу различных типов термодросселей.

В последние годы компьютерное моделирование различных устройств привлекает значительное внимание, поскольку позволяет сократить время и существенно снизить затраты на разработку приборов. Это особенно важно для систем, комплексное исследование которых затруднительно, или требует больших материальных издержек. К такого рода системам относится устройство запуска и электропитания стационарного плазменного двигателя (СПД), первичным источником которого является солнечная батарея (СБ), а нагрузкой – СПД, способный работать только в условиях глубокого вакуума.

Цель моделирования – получить точное представление о процессах, происходящих в схеме устройства запуска и электропитания СПД во всех режимах его работы, определить принципиальные особенности управления и провести анализ устойчивости схемы. Следовательно, интегрированная модель каналов электропитания СПД должна включать модели СБ, СПД, устройства запуска и электропитания СПД.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) СБ описывается выражением [1]

$$I_{\text{сб}} = I_{\text{к.з}}\left(1-\exp\left(\begin{matrix}\left(\dfrac{U_{\text{сб}}}{U_{\text{х.х}}}-1\right)\times \\ \times\ln\left(1-\dfrac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{к.з}}}\right)/\left(\dfrac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{х.х}}}-1\right)\end{matrix}\right)\right), \quad (1)$$

где $I_{\text{к.з}}$ – ток короткого замыкания СБ (при $U_{\text{сб}}$=0); $U_{\text{сб}}$ – мгновенное значение выходного напряжения; $U_{\text{х.х}}$ – максимальное выходное напряжение (при $I_{\text{сб}}$=0); $I_{\text{опт}}$ и $U_{\text{опт}}$ – оптимальные ток и напряжение, соответствующие максимальной мощности.

Канал разряда анод – катод СПД имеет сложную нелинейную ВАХ с участком отрицательного динамического сопротивления, что не позволяет описать ее одним математическим выражением. В общем виде ВАХ канала разряда СПД можно представить следующим образом [2]:

$$I_{\text{р}} = \begin{cases} 0, \text{ при } U_{\text{р}} < 70\text{ В}, \\ \dfrac{eI_{\text{тд}}}{\dot m}\sqrt[4]{\left(\dfrac{U_{\text{р}}-U_{\text{з}}}{U_{\text{рi}}-U_{\text{з}}}\right)}\left(1+V_{ex}\sqrt{\dfrac{M}{2e(U_{\text{р}}-{}^\wedge U_{\text{з}})}}\right), \\ \quad \text{при } 70\text{ В} < U_{\text{р}} < U_{\text{рi}}, \\ \dfrac{eI_{\text{тд}}}{\dot m}(1+0{,}00065\cdot(U_{\text{р}}-U_{\text{рi}}))\times \\ \quad \times\left(1+V_{ex}\sqrt{\dfrac{M}{2e(U_{\text{р}}-{}^\wedge U_{\text{з}})}}\right), \\ \quad \text{при } U_{\text{р}} > U_{\text{рi}}, \end{cases} \quad (2)$$

где e – заряд электрона ($1{,}6\cdot0^{-19}$ Кл); $I_{\text{тд}}$ – ток термодросселя; $\dot m$ – секундный расход рабочего вещества; $U_{\text{р}}$ – напряжение разряда; $U_{\text{з}}$ – напряжение, при котором появляется ток разряда; $U_{\text{рi}}$ – напряжение разряда, соответствующее началу участка отрицательного сопротивления; V_{ex} – скорость плазменной струи на выходе сопла двигателя (около 6000 м/с); ${}^\wedge U_{\text{з}}$ – переменная составляющая (пульсации) напряжения разряда.

Реализовать выражения (2) в модели аналитическим путем достаточно сложно, поэтому использован способ табличного описания функций, который в системе сквозного проектирования электронных устройств Orcad 9.2 реализован на базе блока G_table, представляющего собой модель источника тока, управляемого напряжением. Полученная ВАХ показана на рис. 1.

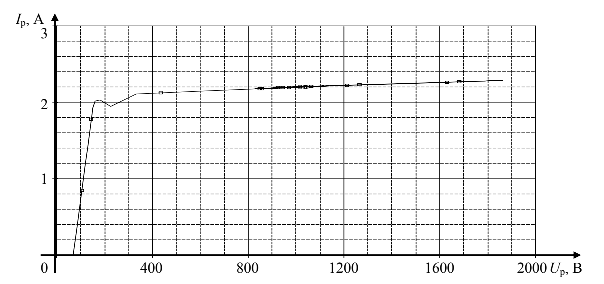


Рис. 1. *ВАХ канала анод – катод*

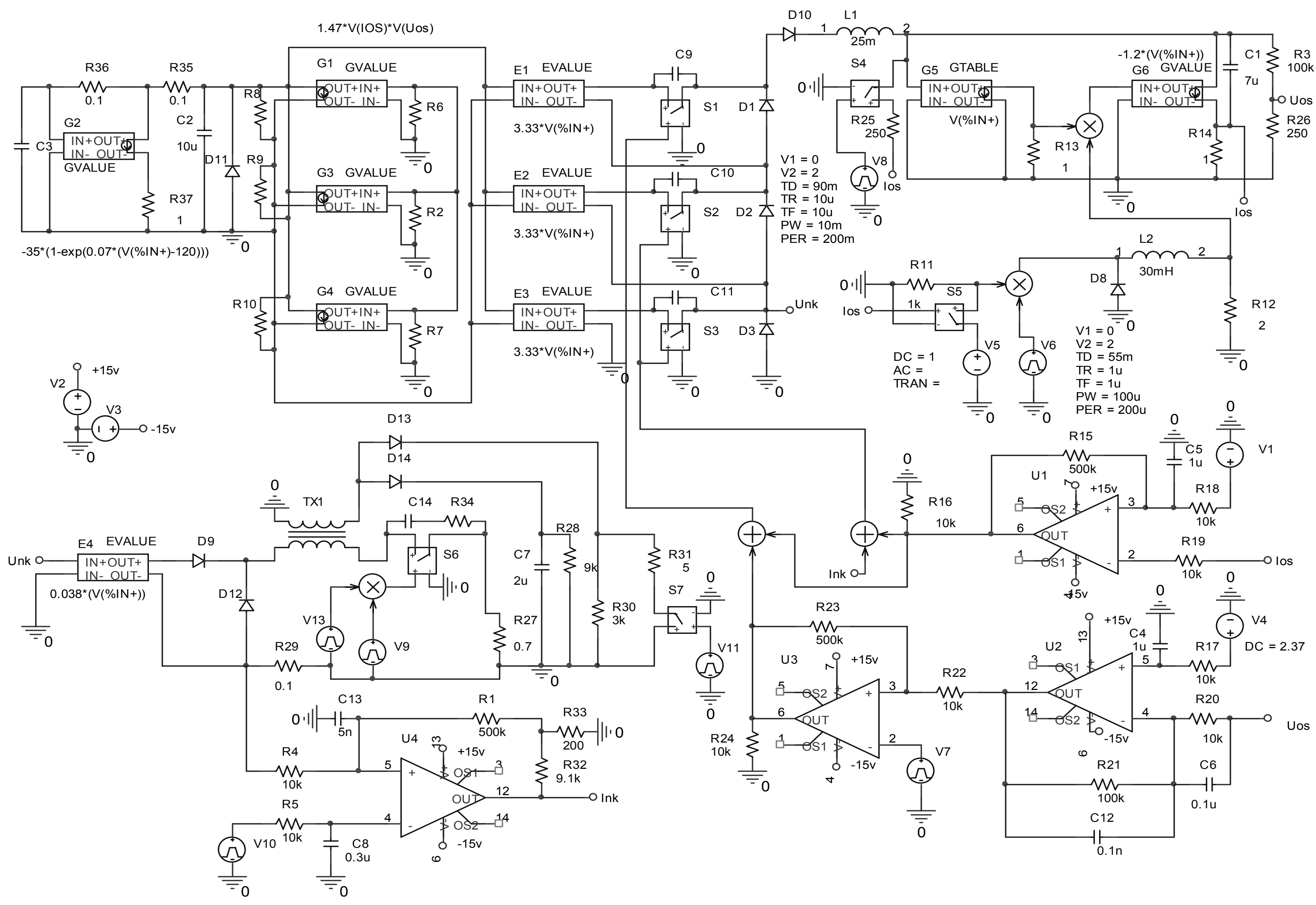


Рис. 2. *Интегрированная модель каналов электропитания СПД*

Модель устройства запуска и электропитания СПД с одной стороны должна быть связующим звеном между моделями СБ и СПД, а с другой – адекватно отражать реакцию схемы при воздействии на ее входы изменяющихся во времени сигналов. С учетом этого разработана интегрированная модель каналов электропитания анод – катод, нагревателя катода (НК), электрода поджига (ЭП) и термодросселя с замкнутыми обратными связями, рис. 2. Она выполнена на базе совмещенного устройства запуска и электропитания СПД [3]. Это реализовано тремя парами функциональных блоков: G1-E1, G3-E2 и G4-E3. Источники тока, управляемые напряжением G1, G3 и G4, являются нагрузкой для модели СБ (G2), а потому их задача – трансформировать ток нагрузки анод – катод в ток нагрузки СБ, отсюда их ВАХ определяется как

$$I_{G1} = \frac{U_{E1}+U_{E2}+U_{E3}}{3U_{\text{сб.хх}}}(I_{G6}+I_{\text{хх}}) \approx$$

$$\approx \frac{U_{E1}+U_{E2}+U_{E3}}{3U_{\text{сб.хх}}}\cdot\eta\cdot\frac{U_{IOS}}{R_{14}}\cdot\frac{U_{OS}\,(R_3+R_{26})}{R_{26}\,(U_{E1}+U_{E2}+U_{E3})},$$

где $I_{\text{хх}}=I_{R3}=I_{R26}$; $U_{\text{сб.хх}}$ – напряжение СБ на холостом ходу; η – КПД устройства запуска и электропитания (0,85...0,92); U_{IOS} – сигнал датчика тока разряда; U_{OS} – сигнал датчика напряжения анод – катод.

Зависимые источники E1–E3 выполняют роль трансформаторов постоянного напряжения с таким коэффициентом передачи, чтобы суммарное выходное напряжение было не менее номинального значения $U_{\text{р.ном}}$, тогда

$$U_{E1} = \frac{U_{\text{р.ном}}}{3U_{\text{вх.мин}}}U_{\text{сб}},$$

где $U_{\text{р.ном}}$ – номинальное напряжение разряда анод – катод; $U_{\text{вх.мин}}$ – минимальное входное напряжение.

Т.е. напряжение разряда есть сумма

$$U_p = U_{E1}\gamma_{S1} + U_{E2}\gamma_{S2} + U_{E3}\gamma_{S3},$$

где γ_{S1}, γ_{S2}, γ_{S3} – регулировочные характеристики ключей S1–S3 (0...1).

Канал стабилизации напряжения разряда выполнен как односторонний широтно-импульсно-модулируемый регулятор (U2, U3) с модуляцией переднего фронта и инерционным звеном (R20, C6) на основе динамических моделей операционных усилителей. Канал ограничения тока разряда выполнен в виде релейного регулятора на базе динамической модели быстродействующего операционного усилителя LT1037CS (U1). Поскольку изменение сопротивления НК имеет инерционный характер, а канал тока НК представляет собой электрическую цепь первого порядка (L_{TX1}, R_{27}), его система управления выполнена на базе релейного регулятора (U4). Замкнутая обратная связь (S5) по сопротивлению нагрузки (расходу рабочего вещества) позволяет получить более точное представление о режимах работы элементов схемы по сравнению с лабораторными исследованиями физических макетов на активную нагрузку.

Режимы работы устройства запуска и электропитания обусловлены принципом действия СПД, на основании чего составлен план исследования, который в модели реализован алгоритмом работы независимых источников (рис. 3).

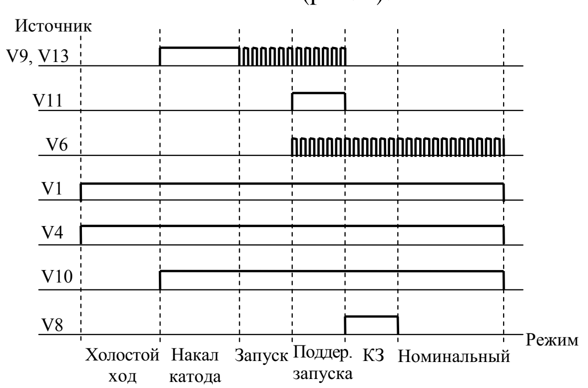


Рис. 3. *Алгоритм работы модели при исследовании режимов работы СПД*

В результате моделирования получены диаграммы токов и напряжений на всех элементах схемы, на основании которых сделан вывод о работоспособности схемы и происходящих процессах. На рис. 4 показаны диаграммы работы каналов электропитания СПД в различных режимах.

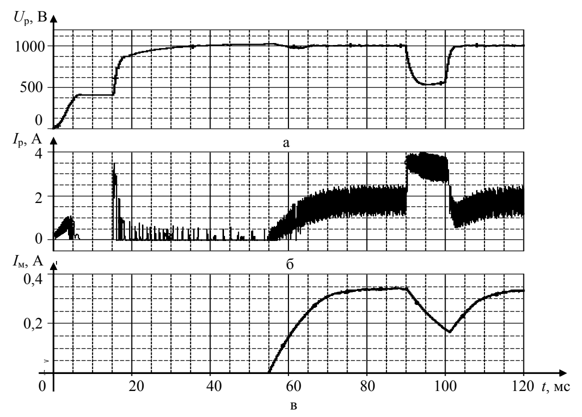


Рис. 4. *Диаграммы работы модели: а) напряжение и б) ток канала анод – катод; в) расход рабочего вещества, пересчитанный в токовые единицы*

На основании полученных диаграмм можно провести анализ устойчивости схемы по переходной характеристике. Для этого необходимо определить наибольшее перерегулирование в системе. Наибольшие перерегулирование напряжения разряда анод – катод и колебательный процесс (рис. 4, *а*) возникают в момент появления тока разряда (рис. 4, *б*) при подаче рабочего вещества в разрядную камеру (рис. 4, *в*). Величина перерегулирования Δh для этого случая

$$\Delta h = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}\cdot 100\,\% = \frac{1035-1000}{1000}\cdot 100\,\% = 3,5\,\%.$$

В соответствии с “гипотезой фильтра” система считается устойчивой (с запасом по фазе $\gamma_c>30°$), если перерегулирование в затухающем переходном процессе $\Delta h<30$ %.

Разработанная модель позволяет имитировать все режимы работы устройства запуска и электропитания СПД на базе совмещенного преобразователя, а также моделировать различные варианты запуска двигателя и работу различных типов термодросселей. Модель разработана с учетом нелинейности ВАХ источника питания (СБ) и участка отрицательного динамического сопротивления нагрузки (канал разряда анод – катод СПД). Замкнутая обратная связь по сопротивлению нагрузки (расходу рабочего вещества) позволяет получить более точное представление о режимах работы элементов схемы по сравнению с лабораторными исследованиями физических макетов при работе на активную нагрузку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.И., Казанцев Ю.М., Поляков С.А., Лекарев А.Ф. Способ стабилизации выходного напряжения системы электропитания КА // Третий Сибирский Междунар. авиа-космический салон САКС 2004: Сб. докл. Междунар. научно-практ. конф. – Красноярск, 2004. – С. 43–48.
2. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. Т. 1. Элементы динамики потоков ЭРД. – М.: Атомиздат, 1978. – 328 с.
3. Пат. 2265135 РФ. МПК[7] F03H 1/00. Устройство запуска и электропитания электрореактивного плазменного двигателя / М.В. Михайлов, Н.М. Катасонов. Заявлено 14.04.2003; Опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33.

УДК 629.783:5233+519.7+62-69